PHYSICAL GROUNDS AND METHODS OF MAGNETIC FIELD GENERATION

Yu. P. GAIDUKOV

The physical aspects of magnetic fields generation are reviewed qualitatively. Much attention is given to the techniques used in scientific researches, particularly in solid state physics. The sketches of electromagnets, solenoids and explosive magnetic devices are presented. The physical and technical limitations of magnetic field value are discussed.

Качественно рассмотрены физические основы генерации магнитных полей в широком диапазоне значений, применяемых в лабораторных исследованиях, главным образом в физике твердого тела. Схематически представлены конструкции электромагнитов, различного рода соленоидов и взрывных устройств. Обсуждаются физические и технические ограничения на величину максимально достижимого поля различными методами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ю. П. ГАЙДУКОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки немыслимо без проведения экспериментальных исследований. Получаемые при этом опытные факты ценны главным образом тем, что приводят к открытию новых, не предсказанных ранее явлений. На их основе появляется возможность создавать приборы, работающие на новых принципах. Последние оказываются либо более чувствительными и позволяют глубже и шире исследовать уже известную область науки, либо вооружают ученых для поиска новых явлений. Открытие явления, исследование его, изобретение на его основе прибора и дальнейшие исследования с помощью нового прибора – этапы построения здания науки об окружающем материальном мире.

В самом общем виде можно сказать, что в науке для познания Природы используются в качестве инструментов различного рода взаимодействия и поля. Воздействуя на вещество тем или иным полем, изучают отклик вещества на это воздействие. Анализируя его, делают заключение о природе явления. Наиболее эффективным средством воздействия является магнитное поле, так как магнетизм – широко распространенное свойство веществ.

Цель настоящей статьи – дать качественное описание наиболее распространенных методов получения магнитных полей. Большая часть этих методов является результатом развития научных знаний и достижений техники последних десятилетий. При этом они бурно развиваются и в настоящее время, так как потребность в них велика в силу ощущения открытия новых горизонтов для развития как научных знаний, так и техники.

Хотя магнетизм был известен человеку с древних времен, магнитное поле становится инструментом научных исследований только после открытия датским физиком Эрстедом в 1820 году связи между током и магнитным полем: электрический ток порождает магнитное поле. Это дало начало новому разделу физики – электромагнетизму. Металлический провод с током, свернутый в катушку (соленоид), вскоре после этого открытия и был первым генератором постоянного магнитного поля. Техника этого времени и долгое время после не позволяла получить сколько-нибудь сильные магнитные поля с помощью соленоидов, и основным устройством

для этого был электромагнит – система из железного сердечника, помещенного в магнитное поле соленоида. Железо усиливает поле соленоида в сотни раз. Но поле электромагнита ограничено по величине практическими пределами. Поэтому с середины двадцатых годов нашего столетия более сильные магнитные поля стали получать с помощью специальных соленоидов, используя при этом весь накопленный арсенал достижений науки и техники.

Ниже дается обзор методов получения магнитных полей.

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

Электромагниты до сих пор не утратили своего значения и широко применяются в науке и технике. Это связано со сравнительной простотой и дешевизной получения стационарных постоянных полей, пригодных для многих научных задач.

Рассмотрим простейшее устройство: многовитковую и многослойную катушку, намотанную на круглый сердечник, выполненный в виде замкнутого кольца. Положим, что размеры сечения ферромагнетика существенно меньше размеров кольца. По катушке течет ток I. Он создает поле $H = 0{,}4\pi nI$,[1] где n – плотность числа витков обмотки на 1 см. Это поле наводит в ферромагнетике дополнительное поле $H_ф$. Суммарное поле (магнитная индукция) $B = H + H_ф$.

Для качественного описания работы электромагнита можно допустить, что до некоторого значения $H = H_{нас}$ величина $H_ф$ существенно и линейно зависит от H, а в больших полях практически не зависит от него (ферромагнетик насыщается). Тогда при $H < H_{нас}$ $B = \mu H$, где μ – магнитная проницаемость. Видно, что в полях соленоида, больших $H_{нас}$, прирост магнитного поля B возможен лишь за счет поля соленоида.

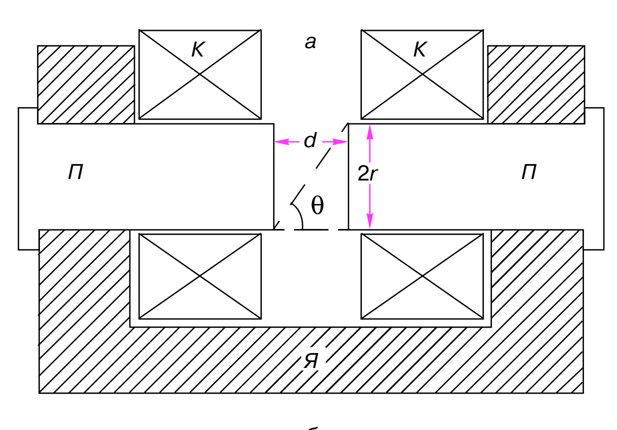
Практически для технически чистого железа (мягкие стали) величина $\mu \approx 100$, а $B_{нас} \approx \mu H_{нас}$ около $2 \cdot 10^4$ Э. Ряд сплавов обладает несколько большим значением $B_{нас}$. Так, пермендюр (сплав 50% Fe + + 50% Co) имеет $B_{нас} = 2{,}4 \cdot 10^4$ Э. Еще большее значение $B_{нас} \approx 3 \cdot 10^4$ Э имеет поликристаллический диспрозий, но он редко применяется, так как ферромагнитные свойства проявляются в нем ниже комнатных температур. Поэтому основным материалом для изготовления электромагнитов является железо.

Для того чтобы использовать поле B, необходимо ферромагнетик разомкнуть. Тогда поле H_0 в образовавшемся пространстве щели, если расстояние d между торцами $d \ll D$ (где D – диаметр сечения щели), будет совпадать с B, $H_0 \approx B$. При увеличении d величина H_0 будет уменьшаться из-за неизбежного рассеяния магнитного потока в пространстве. В общем случае $H_0 < B < B_{нас}$.

Практически электромагниты делают из двух железных цилиндров (полюса) радиуса r, на которые насажены короткие катушки; максимальное поле катушек обычно не превышает 500 – 1000 Э. Полюсы плотно вставляются в железное ярмо, замыкающее магнитный поток. Между оставшимися свободными торцами, расстояние между которыми d, образуется межполюсное рабочее пространство с размерами d, $2r$ (рис. 1*а*). Максимальное поле в нем достигается в центре и дается выражением

$$H_0 = B_{ср}(1 - \cos\theta), \qquad (1)$$

где $B_{ср}$ – некоторое усредненное по поверхности торцов поле, $B_{ср} < B < B_{нас}$.



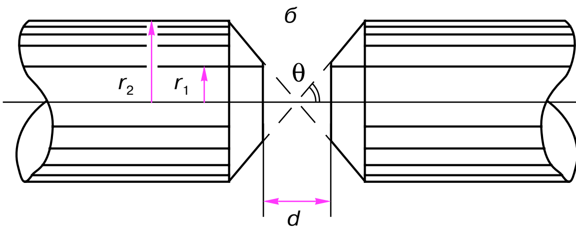


Рис. 1. *а* – Схема электромагнита: *к* – катушки, *п* – полюсы, *я* – ярмо.
б – Конусные полюсные наконечники.

На первый взгляд кажется, что получить поле H_0, большее $B_{нас}$, варьируя d и r, нельзя. Это действительно так для рассмотренной формы полюсов и их окончаний в межполюсном пространстве (полюсные наконечники). В общем случае за счет другой формы полюсов и особенно формы полюсных наконечников поле H_0 может существенно превосходить поле $B_{нас}$. Практически это может происходить лишь за счет наращивания массы железа.

Рассмотрим частный случай полюсов и полюсных наконечников, изображенных на рис. 1*б*. Точное выражение для этого случая:

$$H_0 = B_{ср}\left(1 - \cos\theta + \ln\frac{r_2}{r_1}\cos\theta\sin^2\theta\right). \qquad (2)$$

[1] Везде ток дается в амперах (А), магнитное поле – в эрстедах (Э).

Здесь третий член представляет дополнительный вклад в H_0 от того объема полюсов, который образуют конусные поверхности полюсных наконечников. Именно конусность позволяет послать дополнительные силовые линии в центр межполюсного пространства. Третий член при определенном угле θ достигает максимума. Его значение примерно 55°. Поэтому часто полюсные наконечники выполняются в виде усеченных конусов с углом раствора порядка 110° – 120°. Размер r_1 определяет объем межполюсного пространства, в то время как r_2 – объем всего магнита, так как площадь сечения ярма не может быть меньше, чем у полюсов. Увеличивая r_2, то есть наращивая объем железа, можно увеличить H_0 и превысить значение $B_{нас}$. Но зависимость H_0 от r_2 довольно слабая, что приводит к практическим ограничениям (приемлемые размеры и вес) достижения больших полей с помощью электромагнитов.

Рекордные величины H_0 были получены на двух электромагнитах. Один из них был сконструирован в начале 30-х годов нашего столетия в Парижской Академии наук. Его общий вес (главным образом железа) около 150 тонн, габариты $6 \times 3 \times 2$ м^3, потребляемая мощность 100 кВт. В центре межполюсного пространства ($r_1 = 1$ см, $d = 1$ см) он давал поле $H_0 = 6{,}5 \cdot 10^4$ Э. Другой магнит был сконструирован в Университете г. Упсала (Швеция) в 1934 году. Его общий вес – 37 тонн. За счет лучшей формы полюсов, а также ярма – толстостенного цилиндра, внутри которого размещались полюсы и катушки, при меньшем весе удалось получить большее поле $H_0 = 7{,}5 \cdot 10^4$ Э в таком же объеме, что и у первого магнита. Рядовые же лабораторные электромагниты дают возможность получать максимальные поля до $3 \cdot 10^4$ Э, потребляя при этом скромную мощность в 1 – 5 кВт.

Любопытно отметить, что самым грандиозным из электромагнитов (а может быть, вообще изделий из железа) является магнит синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Вес его ярма – 30 тыс. тонн. В тороидальном объеме межполюсного пространства (диаметр кольца 150 м и диаметр сечения около 2 м) он создает поле порядка $2 \cdot 10^4$ Э.

2. СОЛЕНОИДЫ

Из предыдущего видно, что получить с помощью электромагнита поле, большее, скажем, 10^5 Э, практически невозможно. Дальнейший путь увеличения поля – использование соленоидов без ферромагнетика. В соленоидах поле генерируется только за счет протекающего тока, и максимально достижимые магнитные поля зависят от величины мощности, которую можно “загнать” в соленоид.

Соленоиды бывают различных типов: многовитковые многослойные катушки, спирали плоские и геликоидальные, набранные из дисков и цельноточеные из металлических прутков, одновитковые и др. По своему значению они делятся на два больших класса: соленоиды для получения стационарных магнитных полей, то есть таких полей, которые могут по желанию экспериментатора долго держаться при определенных фиксированных значениях, и соленоиды для получения импульсных магнитных полей, существование которых возможно лишь в течение короткого времени (в общем случае не более 1 секунды). С помощью соленоидов первого типа генерируются поля до $2{,}5 \cdot 10^5$ Э. Импульсные соленоиды позволяют получить поля до $5 \cdot 10^6$ Э.

Принято поля в диапазоне 10^5 – 10^6 Э называть сильными, а свыше 10^6 Э – сверхсильными. Если во время получения поля соленоиды не деформируются и не сильно нагреваются, то поле в них пропорционально протекающему току: $H = kI$, где k – константа соленоида, которая поддается точному расчету.

Рассмотрим сначала соленоиды стационарного магнитного поля. Они делятся, в свою очередь, на резистивные и сверхпроводящие.

Резистивные соленоиды изготавливаются из материалов, имеющих электрическое сопротивление. Поэтому вся подводимая к ним непрерывно энергия диссипируется в тепло. Во избежание теплового разрушения соленоида это тепло необходимо отводить. Для отвода тепла используется водяное или криогенное охлаждение, что требует дополнительной энергии, подчас сравнимой с той, что необходима для питания самого соленоида.

Сверхпроводящие соленоиды изготавливаются из сверхпроводящих сплавов, электрическое сопротивление которых остается равным нулю при температурах и полях проведения эксперимента. При работе сверхпроводящего соленоида энергия выделяется лишь в подводящих проводах и источнике тока. Последнее вообще может быть исключено, если соленоид работает в короткозамкнутом режиме, когда поле без потребления энергии может существовать сколь угодно долго при сохранении условий существования сверхпроводимости.

Установки для получения сильных магнитных полей состоят из трех основных частей: источника постоянного тока, соленоида и системы охлаждения. При конструировании соленоида исходят из величины его внутреннего канала d, приемлемого для проведения опытов, и имеющейся мощности источника тока W. Обычно значение d порядка 3 – 5 см. Встает вопрос, как при этих заданных параметрах получить максимальное поле. Эта задача решается точно. Рассмотрим два практически важных случая. Пусть соленоид намотан проводом, тонким по сравнению с размерами круглого каркаса, который имеет прямоугольное осевое сечение В этом случае ток будет равномерно распределен по всему сечению обмотки. Поле в центре рабочего канала соленоида дается выражением

$$H_0 = g\left(\frac{2W\lambda}{\rho d}\right)^{1/2}, \qquad (3)$$

где λ – коэффициент заполнения, равный отношению объема металлического проводника обмотки к объему, занимаемому всей обмоткой ($\lambda < 1$), ρ – удельное сопротивление проводника в Ом · см, g – коэффициент, зависящий лишь от геометрии осевого сечения объема обмотки, то есть от относительных размеров $\alpha = D/d$ и $\beta = l/d$, где D – внешний диаметр, а l – длина соленоида. Максимальное значение $g = 0{,}18$ достигается при $\alpha = 3$, $\beta = 2$. При любых других значениях α и β и прочих равных условиях магнитное поле будет меньше.

Другая конструкция соленоида дает возможность более эффективно использовать имеющеюся мощность, то есть получить большее поле при той же мощности и величине d. Он изготавливается из тонких, обычно медных дисков, разрезанных один раз по радиусу. Диски электрически соединяются внахлест частью своей площади друг с другом, образуя геликоидальную спираль. Между дисками располагается изоляция. Кроме того, диски по многим радиусам имеют круглые или щелевые отверстия, которые при сборке соленоида образуют вдоль его оси сквозные каналы для прокачки охлаждающей жидкости. Начало применению таких соленоидов было положено Френсисом Биттером в конце 30-х годов нашего столетия в США, и поэтому они называются биттеровскими соленоидами. Легко видеть, что ток в биттеровском соленоиде распределен по диску неравномерно: плотность тока j падает от максимального значения j_0 на внутренней части диска с диаметром d к периферии по закону

$$j = j_0\frac{d}{2r}, \quad D \ge 2r \ge d.$$

Решение задачи на максимум поля приводит также к формуле (3), а фактор g достигает максимального значения $g = 0{,}21$ при $\alpha = 6$ и $\beta = 2$, то есть соленоид еще больше сплюснут.

Есть и другие конструкции, в которых g достигает больших значений. Поэтому была решена и общая задача о нахождении такой геометрии соленоида и распределения тока в нем, при которых достигалось бы предельно максимальное значение g. Ответ: $g = 0{,}27$. Но эта величина скорее служит ориентиром для оценок, так как практическая реализация такого соленоида невозможна, поскольку найденное значение достигается при $\alpha, \beta \longrightarrow \infty$ и при довольно сложном распределении плотности тока j по обмотке.

Обратимся к выражению (3). Можно подсчитать, что для соленоида из меди поле порядка 10^5 Э достигается при мощности порядка 1 МВт ($\rho \sim 2 \times \times 10^{-6}$ Ом · см, $\lambda \cong 1$, $d \cong 3$ см). В 1939 году такая величина поля впервые была достигнута в биттеровском соленоиде. Успех пришел после того, как через маленький объем каналов соленоида удалось прокачивать несколько кубометров охлаждающей воды в минуту.

Для водоохлаждаемых соленоидов биттеровского типа дальнейшее увеличение максимального поля H_0 возможно лишь за счет увеличения мощности источника тока[1]. Но при этом должен возрастать перегрев соленоида относительно охлаждающей жидкости. Это ограничивает максимально достижимую величину H_0 для соленоидов стационарного поля: тепловыделение приводит к пленочному кипению охлаждающей жидкости (образование паровой прослойки между металлом и жидкостью), резкому снижению теплосъема и катастрофическому повышению температуры соленоида. Для воды это происходит при потоке мощности около 2000 Вт/см^2. Зная оптимальную площадь охлаждения соленоида, можно подсчитать максимально снимаемую мощность. Подсчеты дают (при $d = 3$ см) примерно 10 МВт и поле около $2 \cdot 10^5$ Э.

Если же уменьшить время работы соленоида так, что соленоид не успеет расплавиться, то максимальное поле будет ограничиваться другим фактором – прочностью соленоида. Электромагнитное взаимодействие токов приводит к двум силам. Одна из них – осевая – сжимает соленоид, другая – тангенциальная – растягивает по радиусу. Они могут привести к пластическому течению материала соленоида и к обрыву обмотки. Для чистой меди предел по механической прочности достигается при $H \approx 2 \cdot 10^5$ Э. Для материалов типа бронзы и стали он в несколько раз больше H (до $7 \cdot 10^5$ Э). Это используется для генерации импульсных магнитных полей (см. далее).

Создание установки с резистивным соленоидом для генерации стационарных полей – большая научно-техническая задача. Поэтому во всем мире имеется лишь около десяти лабораторий с такими установками (США, Франция, Польша, Япония, Россия). Используются соленоиды разных конструкций, работа которых происходит вблизи теплового предела. Эксплуатация соленоидов требует высококвалифицированного персонала и обходится недешево. Львиная доля расходов идет на оплату электроэнергии. Существование и работа таких соленоидов окупается тем, что здесь исследователи из разных областей физики, приглашаемые из других стран, получают важные научные результаты.

Обратимся теперь к сверхпроводящим соленоидам. Как это часто бывает, когда в какой-либо области техники после долгого и трудного пути решается сложная и важная задача, оказывается, что этого же результата можно достичь более простым,

[1] Медь обладает наименьшим удельным сопротивлением. Снизить ρ можно за счет охлаждения соленоида криогенными жидкостями – гелий, водород, неон. В этом случае ρ может уменьшиться в 1000 раз. Но для этой цели пригодны такие металлы, как Al и Na, сопротивление которых очень слабо зависит от магнитного поля.

экономичным и эффективным методом. Пример тому – получение сильных стационарных полей с помощью сверхпроводящих соленоидов. Из многих замечательных свойств явления сверхпроводимости используется основное: отсутствие ниже определенной характерной температуры T_c (критическая температура) электрического сопротивления у ряда металлов и сплавов. Явление сверхпроводимости было открыто в 1911 году голландским физиком Камерлинг-Оннесом в образцах ртути при $T = 4$ K. При температуре кипения жидкого гелия сверхпроводимостью обладают также свинец Pb ($T_c = 7{,}2$ K) и ниобий Nb ($T_c = 9$ K). Это наивысшие значения T_c для элементов.

Сверхпроводимость позволяет изготовлять соленоиды, в которых не происходит диссипация энергии при протекании тока. Но получаемое при этом поле ограничивается тем обстоятельством, что это же поле при достижении определенного значения H_c (критическое поле) разрушает сверхпроводимость и сопротивление восстанавливается. Критическое поле увеличивается при уменьшении температуры от нуля при T_c до максимального значения при $T \longrightarrow 0$ K. Для чистых металлов это значение невелико: у Pb ~ 800 Э, у Nb ~ 2000 Э. В 50-х годах были открыты сплавы металлов, у которых T_c были в диапазоне 10 – 20 K. Но главное – они обладали колоссальными критическими полями.[1] Несколько практически важных сплавов приведены в таблице 1. Технология получения этих сплавов и изготовление из них материалов для обмоток соленоидов сложна и трудоемка. Поэтому соленоид из них не является дешевым изделием. Но эксплуатация таких устройств проста и дешева, так как для этого требуются лишь жидкий гелий и низковольтный источник тока малой мощности (в большинстве случаев не более 1 кВт). Конструкции соленоидов – это катушки, намотанные из композиционных материалов (из сверхпроводника и меди) в виде одножильных и многожильных проводов, шин и лент.

В настоящее время прогресс в этой области достиг такого уровня, что поля до 10^5 Э доступны практически для любой лаборатории, а иметь поле до $(1{,}5 – 1{,}8) \cdot 10^5$ Э – это лишь вопрос финансовых возможностей.

В заключение этого раздела расскажем о замечательной возможности снизить энергозатраты на генерацию еще больших полей (до $3 \cdot 10^5$ Э), которая реализована в ряде стран (Россия, Франция, США). Это использование комбинации из сверхпроводящего и водоохлаждаемого соленоидов (гибридный соленоид), в которой суммируются максимально достижимые поля как того, так и другого. Естественно, что водоохлаждаемый соленоид должен размещаться внутри сверхпроводящего. Конечно, создание установки с гибридным соленоидом – сложная и объемная научно-техническая проблема, и для ее решения необходим труд больших коллективов различных научных учреждений. Гибридная система успешно работает в Институте атомной энергии Российской Академии наук. Ее сверхпроводящий соленоид весит около 1500 кг и в объеме диаметром 40 см дает поле до $7 \cdot 10^4$ Э. Обмотка изготовлена из сплавов NbZn и NbTi. Водоохлаждаемый соленоид намотан медной шиной. При мощности 5,6 МВт (ток 25 кА) в объеме диаметром 5 см получается поле до $1{,}8 \cdot 10^5$ Э. Рекордное суммарное поле системы – $2{,}5 \cdot 10^5$ Э. Это не предел для гибридных соленоидов, так как вполне реально получение полей до 10^5 Э в сверхпроводящем соленоиде и $2{,}5 \cdot 10^5$ Э – в водоохлаждаемом. Можно надеяться, что это вопрос ближайшего времени.

[1] У нас нет возможности изложить хотя бы кратко теоретическое объяснение сверхпроводящих свойств этих сплавов (называемых сверхпроводниками 2-го рода). Оно было дано А.А. Абрикосовым на основе развития теории сверхпроводимости В.Л. Гинзбурга и Л.Д. Ландау (1957 г.); см. литературу.

Таблица 1. Характеристики сверхпроводящих сплавов

Сплав	T_c, K	$H_к$, Э ($T \approx 4$ K)
NbZr	10,5	90000
NbTi	10	120000
Nb_3Sn	18	270000
V_3Ga	14,5	250000

3. ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Импульсные магнитные поля условно делятся на два класса: класс сильных и класс сверхсильных магнитных полей. В первом магнитное поле получается без разрушения и существенной деформации соленоида; его значение лежит в области до $(5 – 7) \cdot 10^5$ Э. Здесь используются главным образом геликоидальные соленоиды, выточенные из прочных материалов (бронзы, стали). Во втором соленоид либо сильно деформируется, либо полностью разрушается; диапазон получаемых с их помощью полей простирается в область свыше 10^6 Э. Соленоиды для сверхсильных полей – исключительно одновитковые. Они просты и дешевы в изготовлении.

Принципиальная возможность использовать импульсные магнитные поля для научных исследований связана с тем, что характерные времена многих физических явлений и процессов существенно меньше времени существования импульсного поля, так что для них последнее можно рассматривать как квазистационарное.

Идея метода получения импульсного магнитного поля была высказана П.Л. Капицей в 1923 году и успешно реализована им в последующей научной деятельности. Идея эта очень проста: для генерации сильного магнитного поля необходима очень

большая мощность ($H \backsim I \backsim W^{1/2}$). Ее можно получить, если сравнительно небольшую энергию E реализовать за короткий промежуток времени τ в соленоиде. Тогда $W \approx E/\tau$. Существенно, чтобы диссипируемая энергия E не приводила к тепловому разрушению соленоида. Установки для импульсных магнитных полей состоят из четырех основных частей: источника энергии, накопителя энергии, ключа и собственно соленоида. В 20-е годы наиболее эффективным накопителем энергии оказался специально разработанный Капицей механический накопитель кинетической энергии. Это был генератор переменного тока, сконструированный для работы в короткозамкнутом режиме. Источником энергии был мотор постоянного тока на 60 кВт. Он раскручивал массивный ротор генератора (2,5 тонны) до 3500 об/мин. В момент, когда напряжение проходило через нуль, механический ключ, синхронно работающий с генератором, замыкал цепь генератора на соленоид на время первого полупериода тока. Часть накопленной в роторе кинетической энергии переходила в электрическую. В цепи соленоида развивалась мощность до 50 МВт при токе до $7{,}2 \cdot 10^4$ А. Соленоиды навивались в несколько слоев шиной квадратного сечения. Шина изготавливалась из кадмиевой бронзы, чье электрическое сопротивление было близко к меди, а механическая прочность – к стали. Капице удалось получить поля до $5 \cdot 10^5$ Э длительностью $\approx 0{,}01$ секунды. Он выполнил на своей установке исследования по физике твердого тела, которые стали классическими.

В последующем в послевоенные годы в этом методе претерпели изменения лишь основные узлы установки: источник энергии – высоковольтные выпрямители постоянного тока, накопители – батареи высоковольтных конденсаторов большой емкости, ключи – вакуумные разрядники. Конденсаторные батареи при емкости в несколько тысяч микрофарад и напряжении до 30 кВ способны накопить энергию в несколько мегаджоулей и получать в импульсе мощность в десятки мегаватт.

По существу, после того как заряженная батарея конденсаторов замыкается на соленоид, электрическая цепь является колебательным контуром, в котором возникают свободные затухающие колебания тока:

$$I = I_0 e^{-kt} \sin \omega t, \qquad (4)$$

где $k = R/L$, частота

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2 C}{4L^2}}.$$

Соответственно L, C, R – индуктивность, емкость и сопротивление всей цепи.

При слабом затухании I_0 можно оценить из баланса энергии:

$$I_0 = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Из (4) видны пути увеличения максимально достижимого поля, когда возможности конденсаторной батареи исчерпаны. Необходимо уменьшать сопротивление и индуктивность подводящей ток цепи. Для этой же цели иногда охлаждают соленоид жидким азотом. Сопротивление соленоида при этом падает в 10 раз.

Импульсные сильные магнитные поля успешно используются во многих лабораториях. Наиболее известна сейчас магнитная лаборатория в Токийском университете, где были недавно получены поля напряженностью до 10^6 Э при длительности импульса $\tau \approx 0{,}01$ секунды.

Метод, аналогичный описанному, применяется и для получения сверхсильных магнитных полей. Увеличение мощности происходит за счет уменьшения длительности импульса (интервал τ перемещается в область микросекунд). Но это одноразовые опыты, так как соленоиды разрушаются. Жертвуя соленоидом и всем, что находится внутри него, удается получать поля $5 \cdot 10^6$ Э. Это рекорд. Он достигнут в Институте атомной энергии РАН в Москве.

4. СЖАТИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Дальнейший прогресс получения еще больших значений поля был связан с оригинальным и красивым методом – увеличением плотности магнитного потока путем сжатия проводящего кольца или цилиндра. Идея и реализация этого метода принадлежат А.Д. Сахарову (1951 г., см. [2]), который работал в то время в закрытой области. В открытой печати этот же метод теоретически рассмотрел Я.П. Терлецкий в 1957 году.

Суть метода в следующем. Возьмем цилиндрическое тонкостенное кольцо из проводящего материала радиусом r_H, которое пронизывает начальное магнитное поле $H_н$. Тогда полный поток магнитного поля через кольцо $\Phi_H = S_н H_н$, где $S_н$ – начальная площадь, заключенная внутри кольца, $S_н = \pi r_H^2$. Подвергнем кольцо быстрой деформации по радиусу (сжатию), такой, что оно изменяется подобно самому себе. В кольце возникнут токи, стремящиеся сохранить поток Φ_H. На конечной стадии сжатия радиус кольца уменьшится до величины $r_к$. Если время затухания тока существенно превышает время сжатия, то потерями можно пренебречь, то есть

считать, что поток через кольцо сохраняется; откуда следует, что конечная плотность магнитного потока[1]

$$H_к = H_н\left(\frac{r_н}{r_к}\right)^2. \qquad (5)$$

Больших успехов в использовании метода сжатия магнитного потока достигли российские и итальянские физики. Первоначально деформация кольца (обычно медного) проводилась с помощью направленного взрыва взрывчатого вещества (ВВ). Один из вариантов опытов показан на рисунке 2*а*. Тонкостенное медное кольцо, называемое “лайнер”, окружает кольцевой заряд ВВ. Внутрь кольца плотно вставлен соленоид с небольшим числом витков. Это импульсный соленоид, задающий начальный поток Φ_H. Его время работы рассчитано так, что оно больше времени затухания тока в кольце, для того чтобы начальное поле смогло проникнуть внутрь кольца. После того как это достигнуто, производится подрыв ВВ по всей внешней периферии. Развивающееся давление приводит к пластической деформации лайнера, и он начинает сжиматься. Сжатие прекращается в тот момент, когда сравниваются электродинамические силы в лайнере с силами взрыва. При удачном проведении опыта, используя массу ВВ в 20 кг, медный лайнер диаметром около 10 см и начальное поле 10^5 Э, удается получить поле до $2 \cdot 10^7$ Э. Имеются и другие варианты сжатия магнитного потока с помощью взрыва (рис. 2*б*).

Более деликатный, изящный и дешевый метод без применения ВВ предложен японскими учеными из Токийского университета. В нем лайнер располагается внутри прочного одновиткового соленоида. Затравочное поле $H_н$ получается от двух катушек, расположенных с двух сторон по торцам лайнера. Разряд мощной батареи конденсаторов на одновитковый соленоид наводит в лайнере токи, текущие в направлении, противоположном токам этого соленоида. Взаимодействие токов деформирует и сжимает лайнер. В этом методе разрушается только лайнер. Метод не требует проведения экспериментов на специальных полигонах. Достаточно стального бокса объемом в несколько кубических метров. Этим методом достигнуты поля до $2 \cdot 10^6$ Э. На рисунке 3 представлены последовательные стадии сжатия лайнера, полученные скоростной фотографией.

Интересно здесь упомянуть, что природа тоже, по-видимому, использует метод сжатия магнитного

[1] Здесь полная аналогия со сверхпроводящим контуром, в котором магнитный поток сохраняется. Действительно, в силу равенства нулю сопротивления электродвижущая сила в контуре

$$E = -\frac{1}{C}\frac{\partial\Phi}{\partial t} = 0,$$

то есть полный поток от времени не зависит, он “заморожен”).

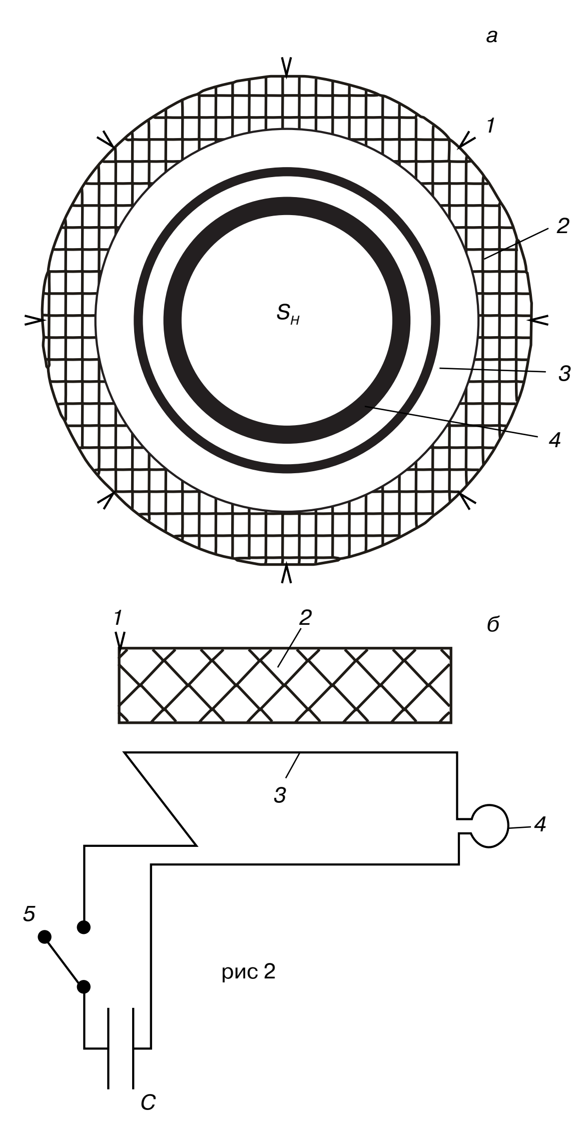


Рис. 2. Варианты метода “сжатия магнитного потока”.

а – Сжатие лайнера: *1* – электрические детонаторы; *2* – взрываемый заряд ВВ; *3* – лайнер – металлическое кольцо; *4* – импульсный соленоид, задающий начальное поле $H_н$; $S_н$ – начальная площадь захвата потока поля.

б – Сжатие потока поля в устройстве типа “кузнечные меха”: *1* – электродетонатор; *2* – пластина ВВ; *3* – профиль изогнутой медной пластины, образующей площади $S_н$ и $S_к$, $S_н \gg S_к$; *4* – одновитковый соленоид, образованный медной пластиной; *5* – ключ; *C* – батарея конденсаторов.

После замыкания ключа *5* батарея конденсаторов *C* генерирует начальный поток поля во всей области $(S_н + S_к)$, охватываемой медной пластиной *3*. В момент достижения максимального тока подрывается заряд ВВ. Взрыв начинается слева, поэтому пластина *3* замыкается, захватывая начальный поток поля. Взрыв распространяется вправо, вытесняя поток в катушку *4*.

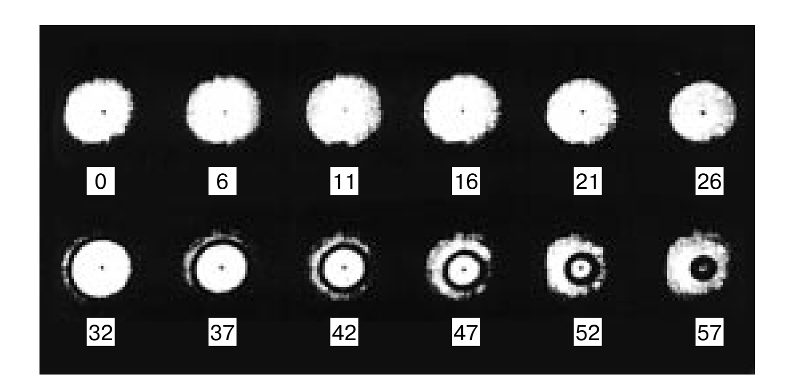


Рис. 3. Скоростная фотография последовательных стадий сжатия лайнера. У каждого фрагмента указано время в микросекундах. Начиная с 32 мкс виден сжимаемый лайнер – темное кольцо.

потока для сверхсильных магнитных полей. Полагают, что при коллапсе массивной звезды и превращении ее в нейтронную ее радиус уменьшается с 10^6 до 10 км. В силу большой проводимости, а возможно и сверхпроводимости на определенном этапе сжатия, захватывается первоначальный магнитный поток. При начальном поле в 10^2 Э поле может возрасти до 10^{12} Э. Природа звезд-пульсаров связывается с существованием таких полей.

Наконец в заключение этого раздела укажем, что и сверхслабые магнитные поля получаются аналогичным способом. Только в этом случае производится не сжатие, а расширение оболочек, выполненных из сверхпроводника. Расширение происходит медленно с помощью механических устройств. Удается получать поля до 10^{-8} Э.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таблица 2 дает представление о величинах магнитного поля и временах их существования, получаемых различными методами.

Конечно, получение сильных магнитных полей не является самоцелью ученых и инженеров, а дает в руки исследователей мощный инструмент познания природы. И этот инструмент эффективно используется. Но мы лишены возможности описать здесь результаты научных исследований. Надеемся, что заинтересованный читатель найдет хорошие обзоры на эту тему в доступной ему литературе, список которой приводится ниже. Прокомментируем его.

В [1] наиболее полно изложены методы получения магнитных полей с помощью электромагнитов, соленоидов и сверхпроводников. В [2] достаточно полно рассмотрен метод сжатия магнитного потока. Сборник [3] позволяет узнать как о принципах генерации магнитного поля, так и о действующих в этой области лабораториях. В нем содержится обзор некоторых результатов, полученных в области физики твердого тела и биологии. В [4] рассмотрены методы и техника генерации сильных и сверхсильных магнитных полей, обсуждаются перспективы прогресса в этой области. Наконец [5] – это специальный выпуск журнала “Природа”, посвященный

Таблица 2. Магнитные поля в природе и лаборатории [4]

Область и время существования поля и метод его получения	H, Э
Нейтронная звезда	10^{12}
Сжатие магнитного потока ($\tau \approx 10$ мкс)	$(2-2{,}5)\cdot 10^7$
Разряд конденсаторной батареи на импульсный соленоид	10^6
То же, однократная разрушающая генерация	$5\cdot 10^6$
Гибридные магнитные системы, стационарное поле	$3\cdot 10^5$
Биттеровские соленоиды, стационарное поле	$2{,}5\cdot 10^5$
Сверхпроводящие соленоиды	$1{,}8\cdot 10^5$
Рекордные электромагниты	$7\cdot 10^4$
Стандартные лабораторные электромагниты	$(2-3)\cdot 10^4$
Постоянные магниты	$(1-8)\cdot 10^3$
Поле Земли	$0{,}2-0{,}5$
Межпланетное пространство	10^{-4}
Сердце человека	$5\cdot 10^{-7}$
Расширение сверхпроводящих оболочек	$3\cdot 10^{-9}$

100-летию П.Л. Капицы. Он интересен в целом, и в нем есть статья, посвященная самым последним достижениям в области сильных магнитных полей и полученных с их помощью научных результатов.

Автор благодарит Н.П. Данилову за помощь при подготовке рукописи этой статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карасик В.Р.* Физика и техника сильных магнитных полей. М.: Наука, 1964.

2. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.

3. Сильные и сверхсильные магнитные поля / Под ред. Ф. Херлаха. М.: Мир, 1988.

4. *Лагутин А.С.*, *Ожогин В.И.* Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1988.

5. “Природа”, 1994, № 4.

* * *

Юрий Павлович Гайдуков, доктор физико-математических наук, профессор кафедры низких температур Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Физик-экспериментатор. Область научных интересов – электронные свойства металлов при низких температурах в сильных магнитных полях. Лауреат Государственной премии СССР. Автор около 100 научных статей и обзоров.